



Controle de vibrações sísmicas em estruturas por meio de circuitos *shunt* piezelétricos

M. A. Quispe-Condo, Departamento de Engenharia Mecânica, EESC/USP, Brasil, mariearacelyqc@usp.br

J. D. Villalba-Morales, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Colômbia, je-sus.villalba@javeriana.edu.co

J. A. Mosquera-Sánchez, Departamento de Engenharia Mecânica, EESC/USP, Brasil, jamosquera@usp.br

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo numérico do comportamento dinâmico de uma estrutura civil de seis andares submetida a excitação sísmica, equipada com elementos piezelétricos e circuitos *shunt* RLC com capacitâncias negativas. O modelo estrutural, baseado em parâmetros concentrados, considera um elemento piezelétrico por andar, com acoplamentos eletromecânicos determinados a partir de dados de fabricantes. A análise foi conduzida exclusivamente no domínio da frequência por meio das funções de resposta em frequência (FRF), permitindo avaliar o desempenho do sistema eletroelástico frente a um sismo. A estabilidade das respostas eletromecânicas foi avaliada utilizando integração das equações de movimento no domínio do tempo, que verificou respostas estáveis e limitadas ao longo do tempo. Os resultados demonstraram redução significativa nas respostas estruturais, especialmente nos dois primeiros modos de vibração, evidenciando a eficácia dos circuitos *shunt* na atenuação das vibrações sísmicas. A pesquisa valida a viabilidade da aplicação de circuitos *shunt* como estratégia de mitigação semi-ativa em edificações sujeitas a eventos sísmicos.

Palavras - chave

Piezelétricos. Circuitos *shunt*. Estruturas civis. Ressonadores piezelétricos.

INTRODUÇÃO

O lado oeste da América do Sul é uma região propensa a terremotos, principalmente devido ao encontro de duas placas tectônicas. O terremoto mais severo das últimas décadas ocorreu na região do Maule, no Chile, com magnitude Mw 8,8, causando grandes danos e resultando na morte de 521 pessoas (Cowan et al., 2011). O uso de sistemas de controle de vibrações passivos e semi-ativos para a proteção de estruturas civis contra terremotos tem ganhado destaque na América do Sul nas últimas décadas, como uma estratégia promissora para a redução da resposta estrutural. Um dos dispositivos mais utilizados é o amortecedor inercial sincronizado (Chen et al., 2020); no entanto, trata-se de um sistema cuja adaptação fina às características específicas do problema, tais como a magnitude (Soto-Brito and Ruiz, 1999), o tipo (Matta, 2013) e o conteúdo em frequência do terremoto (Rakicevic et al., 2012), é desafiadora. Em muitos casos, grandes massas são necessárias para se obter um controle adequado, valores que podem não ser tecnicamente viáveis. Por esse motivo, torna-se relevante explorar alternativas que possam superar as deficiências das tecnologias atuais.

MATERIAIS E METODOS

Este trabalho apresenta a modelagem e simulação numérica de uma estrutura civil sob excitação sísmica com acoplamento eletromecânico por circuitos *shunt* piezelétricos. A metodologia compreende: (i) um *shear-building* de 6 GDL, com lajes como massas concentradas e pilares como molas elasto-plásticas horizontais, amplamente empregado em análises sísmicas pela simplicidade e baixo custo computacional (Zuo et al., 2022), e amortecimento do tipo Rayleigh; e (ii) o acoplamento eletromecânico, no qual cada andar possui um transdutor piezelétrico PZT-5H conectado a um circuito RLC com capacitância negativa, resultando em sistema eletromecânico acoplado:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{w}} \\ \ddot{\mathbf{q}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{w}} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} + \mathbf{K}^P & \mathbf{\Theta} \\ \mathbf{\Theta}^\top & \mathbf{C}_{res}^{-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{w} \\ \mathbf{q} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}(t) \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix},$$

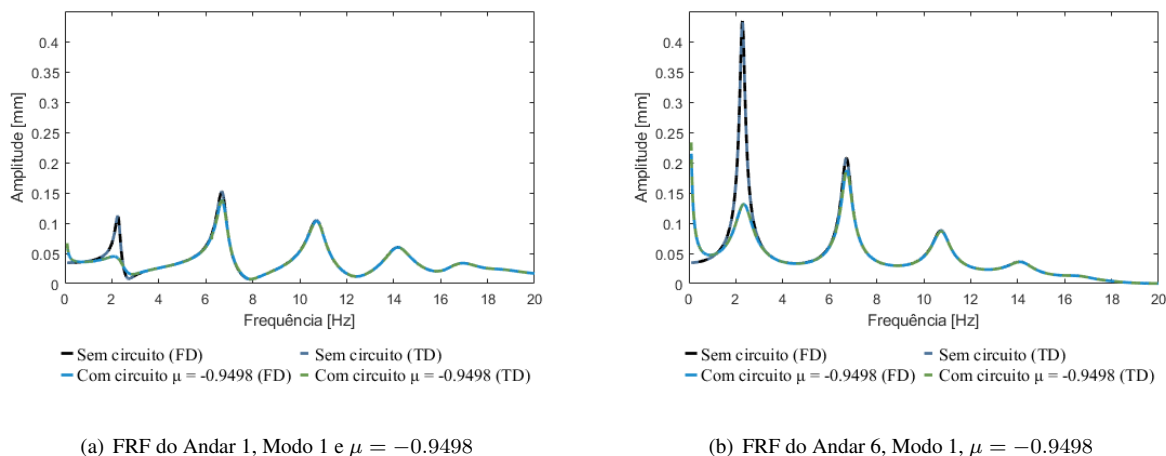
onde \mathbf{w} e \mathbf{q} são, respectivamente, os vetores de deslocamentos mecânicos e cargas elétricas; \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} representam a massa, amortecimento e rigidez estrutural; \mathbf{L} e \mathbf{R} são as matrizes de indutância e resistência dos circuitos *shunt*, respectivamente; \mathbf{C}_{res} representa a matriz de capacitâncias residuais $\mathbf{C}_{res} = (\mathbf{C}_p \mathbf{C}_n) / (\mathbf{C}_p + \mathbf{C}_n)$, com \mathbf{C}_p sendo a capacitância piezelétrica e \mathbf{C}_n é a capacitância negativa; $\mathbf{\Theta}$ é a matriz de acoplamento eletromecânico; $\mathbf{K}^P = \mathbf{\Theta} \mathbf{C}_p^{-1} \mathbf{\Theta}^\top$ é a rigidez do sistema eletromecânico em *circuito aberto*; $\mathbf{0}$ é a matriz nula; e $\mathbf{F}(t)$ representa o vetor das forças aplicadas. A formulação foi implementada no *MATLAB*, com as equações em espaço de estados resolvidas via *ode45* e respostas em frequência



obtidas por métodos clássicos a partir da matriz dinâmica.

RESULTADOS

A Figura 1 mostra as FRFs dos andares 1 e 6 com circuito shunt de capacitância negativa $\mu = -0.9498$, valor máximo obtido por iterações antes da instabilidade.



(a) FRF do Andar 1, Modo 1 e $\mu = -0.9498$

(b) FRF do Andar 6, Modo 1, $\mu = -0.9498$

Figura 1. Funções de resposta em frequência da edificação equipada com circuitos *shunt* RLC com capacitores negativos.

CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados na Figura 1 mostram que os circuitos *shunt* piezelétricos com expressivo cancelamento da capacitância piezelétrica ($\mu = -0.9498$) podem fornecer atenuações significativas das amplitudes dos primeiros dois modos flexíveis da estrutura. A estabilidade das respostas foi verificada integrando os sistemas de equações no domínio do tempo e comparando a amplitude das respostas convergidas com a amplitude das FRFs.

Futuras direções nesta pesquisa consideram a inclusão de elementos elétricos não-lineares nos circuitos *shunt* piezelétricos para o tratamento de eventos sísmicos de curta duração, bem como o estudo numérico da resposta da estrutura usando bases de dados de terremotos representativos da literatura especializada, com a finalidade de avaliar a resposta nominal da estrutura, com a solução de controle proposta, face à esses eventos sísmicos de curta e longa duração.

REFERÊNCIAS

- Chen, H.-Y., Mao, X.-Y., Ding, H., and Chen, L.-Q. (2020). Elimination of multimode resonances of composite plate by inertial nonlinear energy sinks. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 135:106383.
- Cowan, H., Beattie, G., Hill, K., Evans, N., McGhie, C., Gibson, G., Lawrance, G., Hamilton, J., Allan, P., Bryant, M., Davis, M., Hyland, C., Oyarzo-Vera, C., Quintana-Gallo, P., and Smith, P. (2011). The m8.8 chile earthquake, 27 february 2010. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 44(3):123–166.
- Matta, E. (2013). Effectiveness of tuned mass dampers against ground motion pulses. *Journal of Structural Engineering*, 139:1–11.
- Rakicevic, Z. T., Bogdanovic, A., Jurukovski, D., and Nawrotzki, P. (2012). Effectiveness of tune mass damper in the reduction of the seismic response of the structure. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10:1049–1073.
- Soto-Brito, R. and Ruiz, S. E. (1999). Influence of ground motion intensity on the effectiveness of tuned mass dampers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28:1255–1271.
- Zuo, Z., He, Y., and Li, S. (2022). Rational use of idealized shear-building models to approximate actual buildings. *Buildings*, 12(3):273.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP e ao CNPq pelo apoio financeiro concedido para o desenvolvimento deste trabalho (Processo nº 130414/2025-5).

RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.